水蓄熱と組み合わせた躯体蓄熱空調システムのエネルギー評価に関する研究 A STUDY ON THE ENERGY EVALUATION OF THE BUILDING THERMAL MASS STORAGE SYSTEM WITH THE CHILLED WATER STORAGE SYSTEM

中村卓司*, 長野克則**, 金田一清香***

Takuji NAKAMURA, Katsunori NAGANO and Sayaka KINDAICHI

In this paper the energy characteristics of the building thermal mass storage system with the chilled water storage system is evaluated. A typical commercial building model is simulated by a computer and the influence of the regions, the daily weather and the heat load in the room is examined. The results show that the increase rate of the cooling load and the electricity consumption is high in the months of the low cooling load comparing with the non-storage case. And the building thermal mass storage system with the water storage reduces the primal energy consumption by 2.7% and the exhaust carbon dioxide by 10.4% in the optimized case in Tokyo.

Keywords: building thermal mass storage, chilled water storage, evaluation of primary energy consumption

躯体蓄熱, 水蓄熱, 一次エネルギー評価

1. はじめに

近年、建築躯体に蓄熱を行う躯体蓄熱空調システムが、従来の水や氷を用いた蓄熱システムと同様に負荷平準化に役立つものとして検討されている。躯体蓄熱は建物内に既に存在するコンクリートスラブなど建築躯体を蓄熱体とすることで大きな初期コストを必要とせず、水や氷の蓄熱槽や空調機の容量を削減でき、夜間電力の利用によって経済性、環境性も向上可能であるといったメリットが指摘される一方で、その負荷平準化の有効性や省エネルギーに対して外気温など気象条件による影響、地域特性など不明瞭な点も少なくない。特に、夜間建物で蓄熱を行うことによる熱損失、空調機、ポンプなど空調機器の運転時間延長による搬送動力の増加などのデメリットが考えられる。さらに現在の躯体蓄熱の運用においては水蓄熱や氷蓄熱など他の蓄熱システムとの併用を行っている場合が多いため、組み合わせた検討も必要である。

これらの課題に対してはシミュレーションによる検討が考えられるが、過去のシミュレーションによる躯体蓄熱の研究では長井¹⁾によりパッケージ空調機を用いた躯体蓄熱において空調運転の最適化について検討されている。また、盧・宇田川²⁾により空調機を用いた躯体蓄熱において内部発熱、外乱の影響による性能検討が行われている。しかしながら、蓄熱の検討は躯体蓄熱部分にとどまり実運用で多い、他の蓄熱との組合せの影響、性能には踏み込まれていない。他の蓄熱システムとの組合せでは相楽・三浦³⁾により実測とシミュレーションによる検討が行われているが、対象となる蓄熱

システムは氷蓄熱パッケージ空調機となっている。

本論文ではセントラル型の空調システムを検討対象とし、併用する蓄熱システムとしては一般的な水蓄熱を選び、冷房の期間シミュレーションを実施して性能の検討評価を行った。また、空調方式としては躯体蓄熱に適していると考えられる全面床吹き出し空調システムを対象とした。パラメータとしては、地域特性とし、札幌、仙台、東京、鹿児島⁴⁾の4都市を選び、東京に関しては室発熱密度を2段階設定した。また、建物の断熱性の影響、蓄熱時間に関する検討を行った。

2. 検討対象システム

2.1 対象建物概要

検討対象建物は図1に示す日本建築学会のオフィス用標準問題⁴⁾にある建物とした。このうち基準階の事務室の一室の二次元空間を計算対象領域とした。窓ガラス、ブラインドおよび外壁の各物性値は文献にある標準値を使用した。窓ガラスの熱貫流率 7.4W/m²/K、外壁の熱貫流率 1.0W/m²/K となる。室寸法は奥行き 12.3m、天井高 2.6m で、計算領域の幅は単位長とし、外壁側は窓面積率を 30%とした。床はコンクリートスラブ 120mm の上に 150mm の二重床を設けた。二重床は 22mm のコンクリート製の OA フロアパネルと 5mm のタイルカーペットから構成される。気象条件は拡張アメダス気象データを用いて外気温と日射量を与えた。窓ガラスは反射率 7%、吸収率 18%、透過率 75%とした。

* 清水建設株式会社 研究所 工修

** 北海道大学大学院工学研究科 教授・工博

*** 東京大学大学院工学研究科 助教・博士(工学)

Institute of Technology, Shimizu Corporation, M. Eng.

Prof., Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Dr. Eng.

Research Assoc., Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, Dr. Eng.

図1 検討対象事務所ビル平面図

図2 空調システム系統図

図3 検討対象室の断面

2.2 空調システム概要

熱源は空冷ヒートポンプチラーとし、各階2つの事務室に各々1台の空調機を設置する。外気導入は建物全体でまとめて1台の外調機を設け、外気負荷と在室者の潜熱負荷分をあらかじめ処理した後、ダクトで各空調機へ送るものとした。また、蓄熱ケースでは躯体蓄

熱に加えて水蓄熱システムを与えた。図2に空調系統図を示す。

空調方式は全面床吹出し空調システムとした。図3に示すように空調時は各事務室に設置された空調機から二重床内に給気し、穴あきOAフロアパネルと通気性タイルカーペットを通り、床全面から室内に微風速で供給される。蓄熱時は二重床内に冷気を循環させコンクリートスラブとOAフロアパネルに蓄熱した後、床下より還気される。

3. 躯体蓄熱部分の検討

3.1 計算プログラム

計算には武田⁵⁾らによる計算プログラムを用いた。本プログラムは粒状潜熱蓄熱材を用いた躯体蓄熱計算プログラムであるが、全面床吹出し空調を用いた躯体蓄熱空調システムをベースとしているため潜熱蓄熱材量をゼロとすることで躯体蓄熱計算を行うことができる。プログラムの妥当性は実験室実験との検証⁵⁾で行われているため、今回は計算条件のみを変えて計算を行った。

3.2 計算条件とシミュレーションケース

昼間の空調時間(以下、空調時)は8:00から18:00とし、空調時間帯に室内発熱負荷を与えた。室内発熱負荷は、在室者数を0.1人/m²として人体発熱(顕熱分)6W/m²、機器発熱20W/m²、照明発熱15W/m²の合計41W/m²とした。計算は比較のため躯体蓄熱ケースと非蓄熱ケースについて実施した。躯体蓄熱ケースでは現状の電力料金体系を参考に躯体による蓄熱量が水蓄熱量を超えないようにするため22:00から3:00までの5時間の水蓄熱運転、3:00から8:00までの5時間を躯体蓄熱運転とした。また、22:00から8:00までを夜間、8:00から22:00までを昼間と分類した。3:00からの躯体蓄熱時間(以下、蓄熱時)は13℃給気、最大風量で二重床内を循環し蓄熱を行い、蓄熱終了の8:00まで蓄熱運転を行った。空調時の空調機の制御は設定室温26℃に対する変風量制御とし、最大風量30m³/h/m²、最小風量5m³/h/m²、最低吹出し温度19℃と設定した。

シミュレーションケースは地域性を考慮し、札幌、仙台、東京、鹿児島 の4都市について計算を行った。さらに、近年増加している室内発熱が高いケースを東京で設定した。このケースのみ室内発熱を人体12W/m²、機器30W/m²、照明20W/m²の合計62W/m²とした。また、計算期間である冷房期間は5月1日から10月31日とし、土曜日、日曜日は休日と考え非空調日とした。また、計算助走期間は7日間とした。

3.3 結果と考察

3.3.1 シミュレーション結果概要

まず、東京のピーク日(7月31日)を代表として躯体蓄熱の性状の分析を行った。図4は東京ピーク日の室温、給還気温度、風量の経時変化である。室温は躯体蓄熱開始の28.2℃から24.7℃まで低下しているが空調開始とともに設定室温の26℃に保たれている。予冷が不要で立ち上がり特性が良いという躯体蓄熱のメリットの一つが表れている。給気温度は蓄熱時は13℃、空調時は空調開始直後を除き19℃で給気を行っている。風量は蓄熱時は最大風量で給気し、空調時は負荷に合わせて変動している。

次に躯体蓄熱量の算出の基となる躯体温度の経時変化を図5に示

す。本論文では蓄熱対象部位をコンクリートスラブと OA フロアパネルとし、図中の温度は対象部位の平均温度を表している。また、躯体温度は休日の影響をみるためピーク日を含む一週間の変化を示した。休日明けの 7 月 31 日では蓄熱時の温度低下がスラブ 3.1℃、OA フロアパネル 6.5℃となるのに対し、空調時の温度上昇はスラブ 0.0℃、OA フロアパネル 1.4℃となり、スラブは放熱に寄与していない。これは休日中の躯体温度上昇による蓄熱負荷を処理しているためと考えられる。金曜日にあたる 8 月 4 日の結果では、蓄熱時の温度低下がスラブ 2.2℃、OA フロアパネル 4.5℃に対し、空調時の温度上昇はスラブ 2.0℃、OA フロアパネル 3.9℃であり、蓄熱分のほとんどを空調時に放熱している。

次に躯体蓄熱ケースと非蓄熱ケースの空調機負荷の経時変化の比較を図 6 に示す。空調時の棒グラフ中の横線、縦線の部分が躯体からの放熱で非蓄熱との差になり、躯体蓄熱の効果となる。躯体蓄熱による効果は空調開始時から午前中は比較的大きいものの午後は効果が小さくなる。躯体からの放熱の方向では横線で示す給気側である上階への放熱が大部分を占めている。また、図 5 において休日明けの月曜日は休日の蓄熱負荷により、スラブが放熱に寄与していないと述べたが、図 6 において非蓄熱ケースと比較して蓄熱の効果が現れているのは、非蓄熱ケースにおいても休日の蓄熱負荷があるためと考えられる。

最後に図 7 に躯体蓄熱の効率を算出した結果を示して、今回のシステムの性能を検証する。まず、夜間投入熱量のうちどれだけ有効に躯体蓄熱されたかを示す蓄熱投入熱量比率^{注 1)}は月曜日から金曜日まで 85%以上の高い値を示した。通常は 70%以上といわれているので今回のシステムは効率の良いシステムであることが確認された。次に夜間投入熱量が非蓄熱ケースと比較して昼間の空調負荷削減にどれだけ寄与したかを示す蓄熱効率^{注 2)}は月曜日が 71%と小さいものの火曜日以降は 90%以上で蓄熱の投入熱量が昼間の負荷削減に有効に寄与しているといえる。ピークシフト率^{注 3)}は非蓄熱ケースに比べてどれだけ昼間の空調負荷を削減できたかを示す負荷平準化指標であるが、月曜日が最も小さく 29%、水曜日が最も高く 56%で週の平均で 44%であった。躯体蓄熱より顕熱負荷の 4 割が夜間に移行できている。

3.3.2 昼夜空調機負荷ならびに空調機負荷増加率の地域と月別の比較

次に、月別の特性をみるため図 8 に東京ケースの空調機負荷積値と非蓄熱ケースに対する負荷増加率をまとめたグラフを示す。図中、棒グラフが蓄熱ケースの昼夜別空調機負荷積算値、□印の折れ線が非蓄熱ケースの空調機負荷積算値、○印の折れ線が非蓄熱ケースに比した負荷増加率である。全体的な傾向としていえることは、5 月、6 月、10 月の中間期で非蓄熱ケースに比した負荷増加率が大きいということである。そこで、次に地域別の特性を検討するため各ケースの月別の負荷増加率を表 1 にまとめた。これによると、特に札幌、仙台の 5 月、6 月、10 月の結果は 25%を超え大幅な負荷増加となっている。これは中間期では空調機負荷の絶対値が小さくなり相対的に増加率が大きくなるという要因もあるが、躯体蓄熱による夜間負荷だけで非蓄熱ケースの昼間負荷にせまり、熱損失が大きくなると思われる。そのため、負荷増加率の点からすると空調機負荷の小さ

図 4 ピーク日における室温、給還気温度、風量の経時変化（東京）

図 5 ピーク週の躯体温度の経時変化（東京）

図 6 ピーク日の空調負荷の経時変化（東京）

図 7 ピーク週の躯体蓄熱諸効率（東京）

図8 月別の空調機負荷積算値と負荷増加率（東京）

表1 地域別、月別の空調機負荷増加率 [%]

	札幌	仙台	東京	鹿児島	東京(高負荷)
5月	118.3	57.0	21.2	15.3	9.3
6月	36.3	29.4	14.1	8.8	5.6
7月	13.5	12.5	5.8	4.6	3.7
8月	6.8	4.6	4.9	3.5	3.2
9月	13.1	11.8	9.0	5.0	3.7
10月	86.9	34.7	18.7	6.7	7.2
期間平均	23.4	17.5	10.4	6.4	5.0

な時期の躯体蓄熱は行わないほうが良いといえる。全冷房期間と比較すると負荷増加率は札幌 25.3%、仙台 17.9%、東京 10.5%、鹿児島 6.3%、東京の高室内発熱ケース 5.0%となる。空調機負荷が大きくなると負荷増加率は小さくなるが、東京と鹿児島の地域による違いよりは、同じ東京で室内発熱が高いケースの方が負荷増加率は小さくなる。東京の高室内発熱ケースでは全冷房期間で負荷増加率が10%以下となっている。

4. 空調システム全体での消費エネルギーの検討

4.1 空調システムの設定条件と計算条件

空調システムは図2に示す空冷ヒートポンプチラーを熱源とする水蓄熱システムとした。建物負荷の算出は前章で求めた躯体蓄熱の顕熱負荷に外気導入負荷を加えた。外気導入負荷は9:00から18:00まで $5\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ 与えるものとし、別途冷房期間分算出した。建物全体での空調機負荷（顕熱負荷）の算出は前章の単位面積当たり結果を全空調ゾーンに適用するものとし、建物全体の空調面積 $4,880\text{m}^2$ を乗じた。設備容量としては、熱源は東京の建物負荷を参考にメーカーカタログより定格冷却能力 265kW の機種を選び、各々のケースで必要台数分を与えた。表2に熱源機の仕様を示す。また、部分負荷時は容量制御を行うものとし、文献⁶⁾にある部分負荷特性と外気温度補正を与えた。図9に外気温度特性、図10に部分負荷特性を示す。躯体蓄熱用にはどのケースも2台必要となったため、水蓄熱槽の容量は 265kW の空冷ヒートポンプチラー2台が22:00から3:00までの5時間運転する容量 $2,650\text{kWh}$ を与え、蓄熱槽効率は1、熱損失は無いものとした。利用温度差を 5°C とすると、水槽容量は 455.8m^3 となる。蓄熱時の熱源機の運転は、躯体蓄熱計算でも述べたが同一の熱源機を22:00から3:00までの5時間を水蓄熱運転、3:00から8:00までの5時間を躯体蓄熱運転とした。空調ゾーンは各階の事務室を1ゾーンと考え空調機を1台設置するものとした。1ゾーンの空調面

表2 空冷ヒートポンプチラー仕様

定格冷却能力	265.0 kW
定格消費電力（補機含む）	92.1 kW

図9 空冷ヒートポンプチラーの外気温度特性

図10 空冷ヒートポンプチラーの部分負荷特性

表3 システム仕様の比較

	非蓄熱システム	蓄熱システム
空調方式	全面床吹出し方式	
熱源機	空冷ヒートポンプチラー	
	冷却能力 265kW 3台	冷却能力 265kW 2台
水蓄熱槽	無し	455.8m^3 ($2,650\text{kWh}$)
ポンプ	$109.5\text{m}^3/\text{h}$ 、全揚程 250kPa	
空調機	風量 $9,150\text{m}^3/\text{h}$ 、全圧差 381Pa	
水蓄熱	無し	22:00～3:00、5時間
躯体蓄熱	無し	3:00～8:00、5時間

積は 305m^2 であるので最大風量 $30\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ の能力を持ったファン動力を与え、回転数制御による変風量を考慮して動力を算出した。ファン動力は定格値を理論式より求め、部分負荷時の動力はファンの回転数制御特性⁶⁾を与えて算出した。ポンプは各ケースとも非蓄熱ケースの建物負荷の最大負荷を用いて理論式より定格値を与え、部分負荷時はポンプの回転数制御特性⁶⁾を与えて動力を算出した。また、表3に非蓄熱ケースと蓄熱ケースのシステム仕様の一覧を示す。比較のため行った非蓄熱ケースは水蓄熱、躯体蓄熱とも行わない全くの非蓄熱ケースとした。

表4 月別の電力消費量と非蓄熱に対する増加率（札幌）

	空冷ヒートポンプ		空調機		外調機	ポンプ		合計	増加率
	昼間	夜間	昼間	夜間	昼間	昼間	夜間		
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh		
5月	0	3,959	827	2,695	1,630	221	141	9,473	80.1
6月	0	5,702	996	2,695	1,630	225	198	11,446	34.0
7月	0	10,006	1,838	2,573	1,556	261	255	16,489	12.1
8月	0	15,844	2,224	2,818	1,704	448	320	23,358	2.3
9月	0	9,852	1,666	2,695	1,630	277	245	16,365	19.5
10月	0	3,776	908	2,695	1,630	223	149	9,381	59.6
期間計	0	49,139	8,459	16,171	9,780	1,655	1,308	86,512	22.0

表5 月別の電力消費量と非蓄熱に対する増加率（仙台）

	空冷ヒートポンプ		空調機		外調機	ポンプ		合計	増加率
	昼間	夜間	昼間	夜間	昼間	昼間	夜間		
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh		
5月	0	5,295	1,030	2,695	1,630	240	172	11,062	55.7
6月	0	7,355	1,179	2,695	1,630	244	214	13,317	30.9
7月	141	12,830	1,787	2,573	1,556	359	264	19,510	10.8
8月	249	19,393	2,353	2,818	1,704	543	334	27,394	1.2
9月	0	12,952	1,839	2,695	1,630	339	266	19,721	17.4
10月	0	5,781	1,234	2,695	1,630	254	184	11,778	34.4
期間計	390	63,606	9,422	16,171	9,780	1,979	1,434	102,782	17.4

表6 月別の電力消費量と非蓄熱に対する増加率（東京）

	空冷ヒートポンプ		空調機		外調機	ポンプ		合計	増加率
	昼間	夜間	昼間	夜間	昼間	昼間	夜間		
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh		
5月	0	8,567	1,667	2,695	1,630	297	215	15,071	23.0
6月	0	11,516	1,956	2,695	1,630	311	244	18,352	17.8
7月	1,274	17,746	2,333	2,573	1,556	493	287	26,262	2.6
8月	2,925	23,800	3,532	2,818	1,704	713	350	35,842	4.3
9月	1,160	16,780	2,328	2,695	1,630	483	276	25,352	7.6
10月	0	9,477	1,600	2,695	1,630	337	213	15,952	20.4
期間計	5,359	87,886	13,416	16,171	9,780	2,634	1,585	136,831	9.8

表7 月別の電力消費量と非蓄熱に対する増加率（鹿児島）

	空冷ヒートポンプ		空調機		外調機		ポンプ		合計	増加率
	昼間	夜間	昼間	夜間	昼間	昼間	夜間			
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh			
5月	0	10,213	1,759	2,695	1,630	284	233	16,814	15.7	
6月	51	15,166	2,206	2,695	1,630	377	278	22,403	9.5	
7月	1,300	21,893	2,687	2,573	1,556	594	318	30,921	4.8	
8月	3,850	25,967	3,397	2,818	1,704	847	371	38,954	-1.7	
9月	1,363	20,042	3,248	2,695	1,630	562	315	29,855	7.5	
10月	59	13,938	2,675	2,695	1,630	411	249	21,657	7.8	
期間計	6,623	107,219	15,972	16,171	9,780	3,075	1,764	160,604	5.7	

表8 月別の電力消費量と非蓄熱に対する増加率（東京、高室内発熱ケース）

	空冷ヒートポンプ		空調機		外調機	ポンプ		合計	増加率
	昼間	夜間	昼間	夜間	昼間	昼間	夜間		
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh		
5月	0	13,051	3,090	3,607	1,630	401	227	22,006	20.7
6月	115	16,436	2,977	3,607	1,630	455	249	25,469	16.1
7月	4,309	20,835	3,370	3,443	1,556	706	286	34,505	1.7
8月	8,134	25,318	4,433	3,771	1,704	979	341	44,680	2.9
9月	3,496	19,930	3,573	3,607	1,630	671	276	33,183	7.5
10月	386	13,412	3,212	3,607	1,630	466	226	22,939	11.9
期間計	16,440	108,982	20,655	21,642	9,780	3,678	1,605	182,782	8.3

表9 ケース別、月別の蓄熱時間の改善結果

	札幌	仙台	東京	鹿児島	東京(高室内発熱)
5月	1	2	2	2	3
6月	2	2	2	3	3
7月	2	2	3	3	4
8月	3	3	4	4	4
9月	2	2	3	3	4
10月	1	2	2	3	3

表10 月別の電力消費量と非蓄熱に対する増加率（東京、高断熱化・蓄熱時間改善後）

	空冷ヒートポンプ		空調機		外調機	ポンプ		合計	増加率
	昼間	夜間	昼間	夜間	昼間	昼間	夜間		
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh		
5月	1,980	7,704	2,996	1,078	1,630	325	129	15,842	3.0
6月	3,362	8,206	2,468	1,078	1,630	355	138	17,237	0.8
7月	4,173	13,128	2,828	1,519	1,556	449	196	23,849	4.4
8月	3,378	19,305	2,008	2,230	1,704	541	301	29,467	-1.3
9月	2,878	13,147	2,333	1,642	1,630	440	201	22,271	-0.3
10月	1,155	9,706	1,688	2,622	1,630	325	246	17,372	7.3
期間計	16,926	71,196	14,321	10,169	9,780	2,435	1,211	126,038	1.9

図11 地域別、月別の一次エネルギー消費量の比較

図12 地域別、月別の一次エネルギー消費量の比較（高断熱化、蓄熱時間改善後）

図 13 東京における月別の CO₂ 排出量削減率

4.2 計算結果と環境性の面での考察

4.2.1 消費電力量からの検討

表 4 から表 8 に各ケースの月別、機器別の電力量を昼夜に分けて集計した結果を示す。表の最後の列は非蓄熱ケースに比べた合計の増加率である。まず昼夜別の比較では、熱源である空冷ヒートポンプチャラーの夜間移行率は高く、冷房期間平均では札幌 100%、仙台 99.4%、東京 94.2%、鹿児島 94.2%、東京の高室内発熱ケース 86.9% である。また、空冷ヒートポンプチャラーの消費用途別稼働割合を見てみると、ピーク日の合計で夜間の水蓄熱が 41.7%、躯体蓄熱が 30.8%、昼間の追掛け運転が 27.5% となっている。これは逆に考えると全て水蓄熱を行った場合に比べて躯体蓄熱により水蓄熱槽を約 4 割削減できているといえる。

また、空調機などを含めたシステム全体の消費電力量では札幌 77.0%、仙台 79.1%、東京 77.2%、鹿児島 78.8%、東京の高室内発熱ケース 72.3% となり、熱源以外の機器の運転も比重も大きい。次に非蓄熱ケースに比較した電力消費量は前章の空調機負荷でも述べたが、5 月、6 月、10 月の低負荷時、特に札幌、仙台で増加率が高くなっている。

また、熱源機以外の機器の比重も大きいため、機器別に検討を行った。機器用途別の割合では、表 6 に示す東京で熱源 68%、空気搬送系 29%、水搬送系 3% となっている。増加率では空冷ヒートポンプチャラー 2.6%、空調機 48.1%、ポンプ 6.2% となり、特に空調機の増加率が大きくなっている。これは躯体蓄熱ケースでは単純に空調機の運転時間が 1.5 倍になるためであり、特に蓄熱時は最大風量で給気を行うため変風量制御の効果も無いためである。

4.2.2 環境指標からの検討

次に省エネ性の検討を行うため、一次エネルギー消費量での比較を行った。蓄熱を行うことによるメリットの一つに夜間電力のもつ低環境負荷特性がある。電力の一次エネルギー原単位としては省エネ法^{注 4)}に昼夜別の値が定められているので、昼間 9,970kJ/kWh、夜間 9,280kJ/kWh を用いた。図 11 は非蓄熱ケースに比較したケース別、月別の一次エネルギー消費量の増減率を示している。増減率は一次エネルギー消費量、および後述の CO₂ 排出量とも次式により定義した。

$$G = \frac{E - E_0}{E_0} \times 100 \quad (1)$$

G : 非蓄熱ケースに比べた増減率 [%]

E_0 : 非蓄熱ケースの計算結果

E : 蓄熱ケースの計算結果

どのケースでも 8 月は増減率がマイナス(減少)となり、東京、鹿児島では 7 月もマイナスとなった。室内発熱の密度の点では東京の高室内発熱ケースで若干の改善が見られた。この図を用いることで、省エネ性からの躯体蓄熱の運転時期を決定する、あるいは室内環境と比較して運転可否の判断材料になると考える。

次に躯体蓄熱の効果の改善の検討を行った。まず、躯体蓄熱は建物の断熱性にも大きく影響を受ける。今回のモデル建物は仕様が多少古いいため、窓ガラスを Low-E ペアガラス(熱貫流率 1.7W/m²/K、反射率 34%、吸収率 33%、透過率 33%)に変更した。また、蓄熱時間に関しては中間期などの低負荷時に躯体蓄熱 5 時間、水蓄熱 5 時間とすることは過大な蓄熱となるので以下の方法で蓄熱時間の改善を行った。非蓄熱ケースの日空調機負荷が月平均値に最も近い日を月代表日とし、月代表日の日空調機負荷を全て蓄熱分でまかなえるように蓄熱時間を再設定した。その際、躯体蓄熱時間と水蓄熱時間の比率の設定は様々考えられるが、今回はその一例として同時間とした。表 9 にケース別、月別に蓄熱時間の改善を検討した結果を示す。これらの条件をもとにシミュレーションを行った結果が、東京での電力消費量が表 10、一次エネルギー増減率をまとめたものが図 12 である。これによると冷房期間の平均で、仙台以外で増減率がマイナスとなった。また、東京では期間平均で 2.7%削減、5 月から 9 月まで増減率がマイナスとなり高断熱化と蓄熱時間の改善の効果が高いことがわかった。

最後に CO₂ 排出量の点で検討を行った。電力の CO₂ 排出量の昼夜別原単位は法的な値は与えられていないが、東京電力の 2001 年度の実測結果が発表⁷⁾されているので、その値を使って検討を行った。昼間 0.338 kg-CO₂/kWh、夜間 0.276 kg-CO₂/kWh である。ただし、CO₂ 排出原単位は電力会社毎に異なるので、東京の検討のみとした。また、ケースとしては高断熱化、蓄熱時間を改善した結果を用いた。図 13 は月別の CO₂ 排出量の増減率である。一次エネルギー消費量の結果に比べて、蓄熱による削減効果は高くなっている。増減率は冷房期間を通じてマイナス(減少)であり、冷房期間の平均で 10.4% 減少となった。

5. まとめ

本論文では水蓄熱を組み合わせた躯体蓄熱システムに関し、二次側空調機から熱源まで空調システム全体での期間シミュレーションを行い、地域別、月別の特性の評価を行った。また、昼夜別の電力原単位を用いて躯体蓄熱による夜間電力利用の効果の評価を行い、各種指標より躯体蓄熱運転時期について検討を行った。さらに建物の断熱性能、月別の蓄熱時間の改善に関する検討を行った。以下に本論文で得られた知見をまとめる。

1) 水蓄熱との組み合わせの点では、設定条件にもよるが今回の検討

では、全て水蓄熱を行った場合に比べて躯体蓄熱により約 4 割の水蓄熱槽が削減できると考えられる。

- 2) 断熱性の良くない建物でフルに蓄熱を行う場合は、空調機負荷、電力消費量とも冷房負荷の小さくなる 5 月、6 月、10 月で非蓄熱ケースに比べて大きくなる傾向がある。特に札幌、仙台ではこの時期の増加率が高く、これらの地域ではこの時期躯体蓄熱を行うことは不利と考えられる。
- 3) 高断熱化と月別の蓄熱時間の改善を行った場合、非蓄熱ケースに比した電力消費量の増加率、一次エネルギー増減率とも大きな改善が見られた。東京では期間平均で 2.7%削減、5 月から 9 月まで一次エネルギー増減率がマイナス(減少)となり省エネの面での躯体蓄熱の有効性が示された。
- 4) CO₂ 排出量の点では東京の結果より、増減率は冷房期間を通じてマイナス(減少)であり、冷房期間の平均で 10.4%減少となった。電力の CO₂ 排出原単位の値にもよるが、CO₂ 排出量の点では一次エネルギー消費量による評価よりも削減効果が期待できる。

参考文献

- 1) 長井達夫：躯体の熱容量を利用した動的最適化空調運転がエネルギー消費特性に及ぼす影響について、日本建築学会計画系論文集、第 540 号、pp.45-52、2001.2
- 2) 盧炫佑、宇田川光弘：躯体蓄熱空調システム性能のシミュレーションによる検討、日本建築学会計画系論文集、第 544 号、pp.31-38、2001.6
- 3) 相楽典泰、三浦克弘：躯体蓄熱と氷蓄熱ビル用マルチを組み合わせた 4 つの空調方式におけるエネルギー性能比較、日本建築学会環境系論文集、

第 600 号、pp.29-37、2006.2

- 4) 滝沢博：標準問題の提案(オフィス用標準問題)、第 15 回熱シンポジウムテキスト、日本建築学会環境工学委員会熱分科会、pp.35-42、1985
- 5) 武田清香、長野克則、持田徹、中村卓司：粒状潜熱蓄熱材を適用した躯体蓄熱床吹出し空調システムに関する研究(その 2: システムのモデル化と空調機負荷の夜間移行効果)、日本建築学会環境系論文集、第 584 号、pp.47-52、2004.10
- 6) (財)環境建築・省エネルギー機構：建築物の省エネルギー基準と計算の手引き(平成 15 年度版)、改定 10 版、2003.10
- 7) 古森秋文、塚田裕二：系統電力の環境性に関する考察、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.1233-1235、2002.9

注

- 注 1) 蓄熱投入熱量比率とは躯体蓄熱日の躯体蓄熱量を、同一日の夜間投入熱量で除した比率。
蓄熱投入熱量比率[%] = (躯体蓄熱量) / (夜間投入熱量) × 100
- 注 2) 蓄熱効率とは非蓄熱日に比した躯体蓄熱日の昼間の空調機負荷積算値の削減量を夜間投入熱量で除した比率。
蓄熱効率[%] = {(非蓄熱日の昼間の空調機負荷積算値) - (躯体蓄熱日の昼間の空調機負荷積算値)} / (夜間投入熱量) × 100
- 注 3) ピークシフト率とは非蓄熱日に比べて、蓄熱以外の条件が同じ躯体蓄熱日において、昼間の空調機負荷の積算値がどれだけ削減されたかを表す比率。
ピークシフト率[%] = {1 - (躯体蓄熱日の昼間の空調機負荷積算値) / (非蓄熱日の昼間の空調機負荷積算値)} × 100
- 注 4) エネルギーの使用の合理化に関する法律

(2009年7月10日原稿受理、2009年12月10日採用決定)